

6. J. Szargut, Bilans eksergetyczny procesow cieplnych // Energetyka Przemyslowa. – 1961, vol. 9, №3, pp. 73–79.

Научный руководитель: С.А. Хаустов, к.т.н., ассистент каф. ПГС и ПГУ ЭНИН ТПУ.

## **ДИАГНОСТИКА СТРУКТУРЫ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА ПРИ РАСПЫЛЕНИИ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА**

Е.Ю. Шадрин, И.С. Ануфриев  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

### **Введение**

Качественное диспергирование жидкости – одна из актуальных научно-технических проблем. Генерация аэрозолей с малым разбросом параметров по концентрации и дисперсному составу является важнейшей задачей при создании различных теплоэнергетических устройств, разработке технологий нанесения покрытий, систем охлаждения и пожаротушения и многих других. Одним из направлений, использующих распылительные форсунки, является создание эффективных горелочных устройств для утилизации некондиционных углеводородных топлив и горючих производственных отходов. Исследования, проведенные ранее сотрудниками ИТ СО РАН на оригинальных автономных горелочных устройствах испарительного типа [1-3], показали, что процесс сжигания таких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара. При этом улучшаются экологические характеристики процесса. Однако использование горелочных устройств испарительного типа не позволяет достичь высокой производительности.

В данной работе экспериментально исследуется перспективный способ распыла жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара [4]. Отличительной особенностью данного способа является то, что топливо и распыляющая среда (несущая фаза) – водяной пар предварительно не смешаны друг с другом: пар подается из форсунки в виде струи, на которую натекает распыляемое жидкое топливо. На практике это является важным преимуществом, поскольку нет контакта топлива с форсункой. Это предотвращает коксование поверхностей и сбои в работе горелочного устройства.

### **Экспериментальная методика**

Для исследования характеристик распыла жидкого топлива паровой струей был использован интерферометрический метод определения диаметров капель (IPI) [5]. Метод основан на регистрации расфокусированных образов капель, освещаемых лазером. Согласно теории рассеяния Ми [6, 7], свет, отраженный и однократно преломленный сферической поверхностью капли, создает на образах капель интерференционные полосы, частота которых напрямую зависит от диаметра капли. Цифровой анализ полученных изображений позво-

ляет определить положение и размер капель, взвешенных в потоке. Данный метод позволяет измерять частицы с размерами от 10 мкм.

Экспериментальный стенд представлен на рисунке 1. Методика эксперимента заключается в следующем. В поток перегретого водяного пара, истекающего через форсунку (диаметр форсунки – 0.5 мм), свободно натекает дизельное топливо. Струя топлива распыляется, взаимодействуя с высокоскоростной струей перегретого пара. Газокапельный поток освещается импульсным лазером в заданной плоскости (лазерный нож). Образы капель в момент лазерного импульса регистрируются цифровой камерой, на которую установлены: блок оптического сжатия и расфокусированный макро-объектив. Полученные изображения сохраняются на компьютере для дальнейшей обработки с использованием специализированного программного обеспечения.

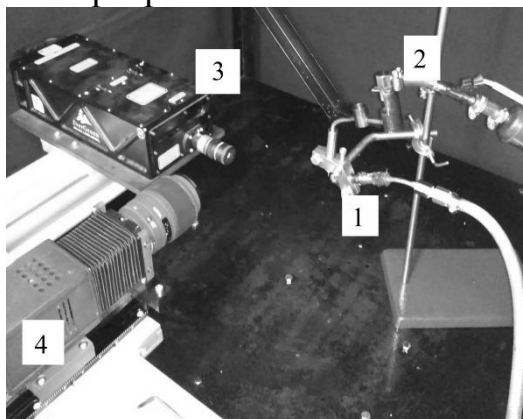


Рис. 1. Фотография экспериментального стенда: 1 – паровая форсунка, 2 – система подачи топлива, 3 – импульсный лазер, 4 – цифровая камера с блоком оптического сжатия.

В экспериментах использовалась IPI-система «Полис». Для регистрации изображений применялась CCD камера Видеоскан 4021 (с разрешением  $2048 \times 2048$  пикселей, частотой съемки до 1.25 Гц, временем экспозиции 28 мс) и макро-объектив SIGMA 105mm F2.8 DG MACRO. Источник света – импульсный лазер Nd:YAG QuantelEVG (длина волны – 532 нм, энергия в импульсе – до 145 мДж, длительность импульса – 10 нс). Блок оптического сжатия использовался для уменьшения образов капель по одной координате с целью увеличения максимальной плотности частиц в исследуемом потоке. Для проведения калибровки камеры и расфокусировки объектива использовался длинноходовой транслятор Edmund 59-336, позволяющий изменять расстояние между объективом и регистрирующей матрицей цифровой камеры. Для подачи перегретого пара использовался электрический парогенератор, позволяющий варьировать расход пара в диапазоне 100-600 г/ч и температуру пара в диапазоне 150-550°C. Система подачи топлива позволяла варьировать расход в диапазоне 300-600 г/ч.

Для обработки полученных изображений использовалось специализированное программное обеспечение ActualFlow с пакетом IPI Kit, в котором реализованы следующие алгоритмы [7]:

- Алгоритм поиска образов капель.
- Алгоритм вычисления частоты интерференционных полос.
- Алгоритм отсева ложных образов.

- Алгоритм определения размеров капель.

## Результаты

В результате обработки изображений получена информация о дисперсном составе капель топлива при различных режимах распыления. В экспериментах варьировались: температура пара (150-550°C); расход пара (100, 300 и 600 г/ч); расход топлива (300 и 600 г/ч). На рисунке 2 представлены гистограммы, характеризующие зависимость размера капель от расхода пара, имеющего на выходе из парогенератора температуру 250°C, при расходе топлива 300 и 600 г/ч.

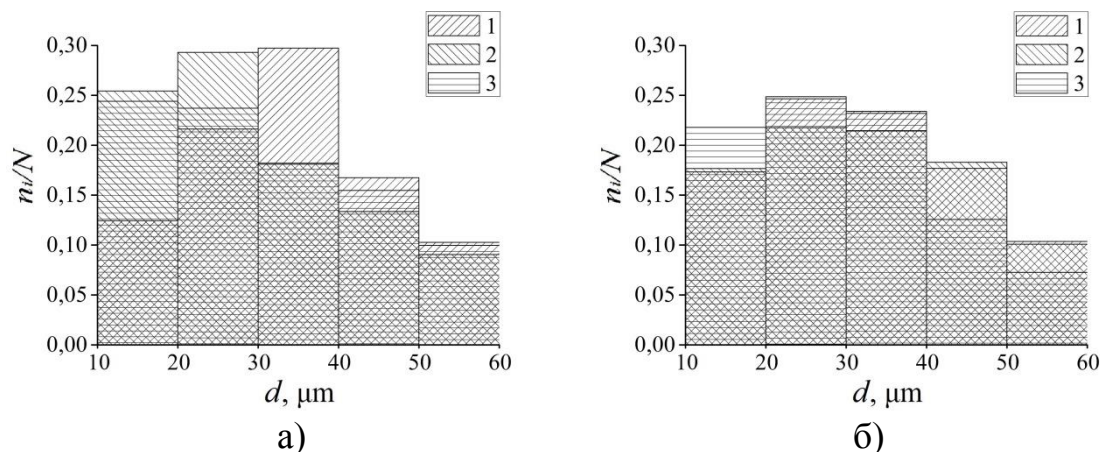


Рис. 2. Дисперсный состав капель топлива, образующихся при распылении дизельного топлива струей перегретого водяного пара в атмосфере (температура пара 250°C; расход пара: 1 – 100 г/ч, 2 – 300 г/ч, 3 – 600 г/ч): (а) расход топлива 300 г/ч; (б) расход топлива 600 г/ч ( $n_i$  – количество капель с размерами из определенного диапазона,  $N$  – общее число идентифицированных алгоритмом капель).

Полученные результаты показывают, что количество мелких частиц (10-20 мкм) увеличивается с ростом расхода пара, и, наоборот, с уменьшением расхода растет количество более крупных частиц (более 30 мкм). При расходе пара выше 300 г/час и расходе топлива 300 г/час характерный размер капель лежит в диапазоне 10-30 мкм. При расходе топлива 600 г/час характерный размер капель увеличивается и лежит в диапазоне 20-40 мкм. Распределение частиц по размерам слабо изменяется при увеличении расхода пара более 300 г/ч, что говорит об эффективности распыла, начиная с указанного значения.

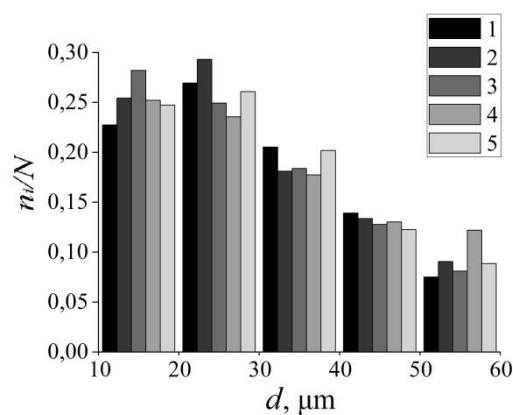


Рис. 3. Дисперсный состав капель топлива, распыляемого перегретым водяным паром, расход пара и топлива – 300 г/ч, температура пара: 1 – 150°C; 2 – 250°C; 3 – 350°C; 4 – 450°C; 5 – 550°C.

Для анализа влияния температуры распыляющей среды была проведена серия экспериментов при различной температуре подаваемого перегретого пара. На рисунке 3 представлены распределения размеров частиц в зависимости от температуры перегрева пара при одинаковом расходе пара и топлива 300 г/ч. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что характеристики распыла не зависят от температуры распыляющей среды и определяются соотношением расходов топлива и пара.

### Заключение

С использованием интерферометрического метода определения диаметров капель проведено исследование характеристик газочапельного потока при распыле жидкого углеводородного топлива струей перегретого водяного пара в широком диапазоне параметров. При расходе пара от 300 г/час достигается высокое диспергирование топлива с характерным размером капель 10-40 мкм для расходов топлива 300 и 600 г/ч. Такой результат диспергирования на практике обеспечивает эффективное сгорание топлива. В то же время, влияние температуры перегретого пара на характеристики газочапельного потока не обнаружено.

Прикладные научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (шифр заявки «2017-14-576-0053-1566»).

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner with injection of a superheated steam jet // Combustion, Explosion, and Shock Waves.- 2016.- Issue 52, No. 3.- P. 286-293.
2. Anufriev I.S., Baklanov A.M., Borovkova O.V., Vigriyanov M.S., Leshchevich V.V., Sharypov O.V. Investigation of soot nanoparticles during combustion of liquid hydrocarbons with injection of a superheated steam jet into the reaction zone // Combustion, Explosion, and Shock Waves.- 2017.- Issue 53, No. 2.- P. 140-148.

3. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Loboda E.L. Study of flame characteristics during liquid hydrocarbons combustion with steam gasification // Proceedings of SPIE 9292.- 2014.- № 929226.
4. Вигриянов М.С., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Шарыпов О.В. Патент РФ на изобретение № 2579298 от 10.04.2016.
5. Lozhkin Yu.A., Markovich D.M., Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Investigation of the structure of a polydisperse gas-droplet jet in the initial region. Experiment and numerical simulation // Thermophysics and Aeromechanics. - 2014.- Issue 21, No. 3.- P. 293-307.
6. Van de Hulst H.C. Light Scattering by Small Particles. - New York: Wiley, 1957.- 496 p.
7. Руководство пользователя: Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (PI). - Новосибирск, 2013.- 34 с.

Научный руководитель: О.В. Шарыпов, д.ф.-м.н., зам. директора, ИТ СО РАН.

## **ГОРЕНИЕ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ**

С.С. Арсентьев, Е.П. Копьев  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Предварительные исследования, проведенные на оригинальных горелочных устройствах мощностью 10–50 кВт [1, 2], показали, что горение жидких углеводородов резко интенсифицируется при подаче в зону горения струи перегретого водяного пара ( $\sim 400^\circ\text{C}$ ), сажа в окончательных продуктах сгорания практически отсутствует. Данный способ сжигания [3] может оказаться перспективным для утилизации низкокачественных топлив и опасных промышленных отходов с производством тепловой энергии. Создание горелочных устройств [2, 4], работающих на некондиционных топливах, нуждается в научном обосновании новых технических решений для обеспечения энергоэффективности и экологической безопасности технологии.

В развитие предыдущих исследований [5] предложенного способа сжигания топлива [2], в которых использовалось автономное горелочное устройство с нерегулируемыми параметрами пара, в данной работе используется новое горелочное устройство (10 кВт), оснащенное электрическим парогенератором (средняя потребляемая мощность 1,5 кВт), позволяющим получать поток перегретого пара в широком диапазоне значений расхода и температуры. По принципу работы исследуемая горелка является испарительной. В основе процесса лежит газификация продуктов термического разложения жидкого топлива. Хотя процессы газификации углеводородов (в том числе, паровой) достаточно известны [6-8], тем не менее, обоснование оптимальных методов управления процессом горения жидких органических топлив (и производственных отходов) с